

# Validierung eines hochzyklischen Akkumulationsmodells anhand von Modellversuchen an Monopiles mit einer großen Anzahl an Belastungszyklen

P. Staubach<sup>1,2</sup>, J. Machaček<sup>2</sup>, T. Wichtmann<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Professur Geotechnik, Bauhaus-Universität Weimar

<sup>2</sup> Lehrstuhl für Bodenmechanik, Grundbau und Umweltgeotechnik, Ruhr-Universität Bochum

## KURZFASSUNG

---

The high-cycle accumulation (HCA) model of Niemunis et al. is applied for the simulation of model tests on monopiles subjected to high-cyclic loading with up to five million loading cycles. A new finite element program for geotechnical applications written by the authors is used for this purpose. The simulations with the HCA model show a good agreement with the deformations measured in the model tests.

*Schlagworte: Hochzyklisches Akkumulationsmodell, Monopile Gründung, Offshore*

## 1 EINFÜHRUNG

Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) sind während ihrer Nutzungsdauer aufgrund des Wind- und Wellengangs einer großen Anzahl an Lastzyklen ausgesetzt. Da der Betrieb der Turbinen der OWEA lediglich geringe Schiefstellungen der Anlage und damit der Gründung toleriert, müssen die Langzeitverformungen der Gründungen von OWEA im Vorfeld möglichst akkurat prognostiziert werden. Hierfür können numerische Simulationen mit speziellen Stoffmodellen eingesetzt werden. Das hochzyklische Akkumulationsmodell (HCA-Modell) von Niemunis et al. (2005) ist ein anhand verschiedener Randwertprobleme validiertes Stoffmodell (siehe z.B. Zachert 2015, Wichtmann et al. 2018 und Machaček et al. 2018), welches für die numerische Untersuchung der Langzeitverformungen der Gründungen von OWEA eingesetzt werden kann (siehe z.B. Staubach & Wichtmann 2020). Die bisher zur Validierung des HCA-Modells herangezogenen Modellversuche an Pfählen waren zumeist auf maximal hunderttausend Zyklen beschränkt. Die OWEA erfahren im Laufe ihrer Nutzungsdauer aber mehrere Millionen Lastzyklen. Um das HCA-Modell auch für solch eine große Anzahl an Zyklen zu validieren, werden in diesem Beitrag von Cuéllar (2011) durchgeführte Modell-

versuche an Monopile-Gründungen simuliert, welche mit bis zu fünf Millionen horizontalen Lastzyklen belastet wurden.

## 2 HOCHZYKLISCHES AKKUMULATIONSMODELL

Für eine Simulation mit einer sehr großen Anzahl an Belastungszyklen ist die Berechnung jedes einzelnen Zyklus nicht sinnvoll, da es zu einer Akkumulation numerischer Fehler kommt und der Berechnungsaufwand sehr groß wird (Niemunis et al. 2005). Bei der Berechnung mit einem Akkumulationsmodell (HCA-Modell) wird daher nur der Trend der Verformung mit zunehmender Anzahl an Zyklen prognostiziert (sog. explizite Berechnung). Das HCA-Modell benötigt für diese Akkumulationsphase die Dehnungsamplitude aus einem einzelnen Belastungszyklus als Eingangsparameter. Daher werden in der Regel zunächst zwei Zyklen mit einem herkömmlichen Stoffmodell (in diesem Beitrag die Hypoplastizität mit intergranularer Dehnung, siehe von Wolffersdorff 1996 und Niemunis & Herle 1997) simuliert, wobei im zweiten Zyklus der Dehnungspfad aufgezeichnet wird, anhand dessen anschließend die Dehnungsamplitude berechnet wird. Da der erste Zyklus i.d.R. deutlich größere Verformungen verursacht, wird dieser nicht zur Bestimmung der

Dehnungsamplitude verwendet. Nach dieser sog. impliziten Phase wird die Akkumulation der Deformation mit zunehmender Anzahl an Zyklen in der expliziten Phase bestimmt. Eine ausführliche Beschreibung der in dieser Phase verwendeten Stoffmodell-Gleichungen findet sich in Niemunis et al. (2005) und Wichtmann (2016).

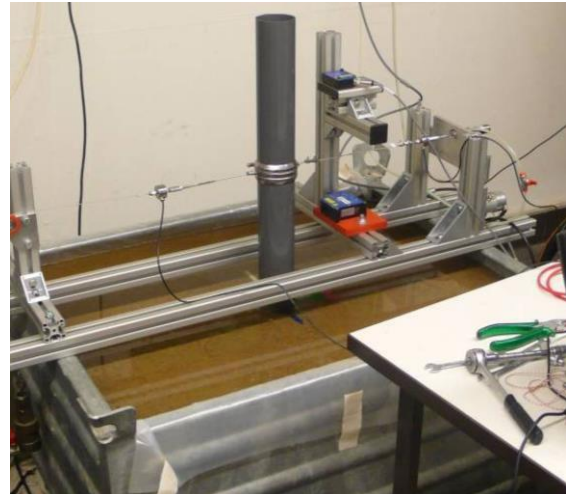
### 3 MODELLVERSUCHE VON CUÉLLAR (2011)

Cuéllar (2011) führte Versuche an einem kleinmaßstäblichen Monopile-Modell durch, welches zyklisch lateral belastet wurde (Versuchsstand siehe Abbildung 1). Der Pfahl hatte eine Einbindetiefe von 30 cm und einen Durchmesser von 7,5 cm. Als Bodenmaterial wurde sog. Berliner Sand verwendet, welcher dicht eingebaut ( $I_{D0} \approx 80\%$ ) und anschließend vollständig wassergesättigt wurde. Die Frequenz der zyklischen Belastung betrug 1 Hz und wurde über die in Abbildung 1 erkennbaren Drähte 30 cm über der Sandoberfläche aufgebracht. Die Verschiebung des Pfahls wurde 20 cm über der Sandoberfläche gemessen. Die genauen Spezifikationen der Modellversuche können Cuéllar (2011) entnommen werden. Am Berliner Sand wurden zyklische Triaxialversuche mit bis zu einhunderttausend Zyklen mit unterschiedlicher Belastungsamplitude, Lagerungsdichte, mittlerer effektiver Spannung und Spannungsverhältnis durchgeführt, um die Parameter des HCA-Modells zu bestimmen (siehe Wichtmann et al. 2018).

## 4 NUMERISCHE SIMULATIONEN

### 4.1 Finite-Elemente Programm numgeo

Für die Simulationen der Modellversuche wurde das durch die ersten beiden Autoren entwickelte Finite-Elemente-Programm numgeo (Macháček 2020, [www.numgeo.de](http://www.numgeo.de)) verwendet. numgeo ist ein speziell auf geotechnische Problemstellung zugeschnittenes, universell einsetzbares Finite-Elemente-Programm, welches sich insbesondere durch eine Vielzahl gekoppelter Elementformulierungen für quasi-statische und dynamische Problemstellungen auszeichnet. Das HCA-Modell sowie die Hypoplastizität mit intergranularer Dehnung sind in numgeo implementiert.



**Abbildung 1** Versuchsaufbau mit Pfahl, eingebautem Sand und Vorrichtung zur Aufbringung der Belastung, nach Cuéllar (2011)

### 4.2 Simulation der Modellversuche

Auch wenn die Autoren in einer früheren Studie auf den Einfluss der Installation auf das laterale Pfahltragverhalten hingewiesen haben (Staubach et al. 2020), wurden die hier beschriebenen Simulationen ohne Berücksichtigung der Installation (wished-in-place) durchgeführt. In der vorangegangenen Studie haben die Effekte aus der Installation bei dicht gelagerten Böden das Langzeitverhalten nicht maßgebend verändert. Der Kontakt zwischen Pfahl und Boden wurde mithilfe der Penalty-Methode erzwungen und mit einer Surface-to-Surface Methode diskretisiert. Reibung in der Kontaktfläche wurde unter Verwendung des Mohr-Coulomb'schen Reibmodells und eines Reibungskoeffizienten von 0,3 berücksichtigt.

Die Simulationen wurden ohne sog. Kontroll- oder Aktualisierungszyklen durchgeführt. Diese Zyklen, mit denen Änderungen der Dehnungsamplitude aufgrund der Steifigkeitsänderungen des Bodens berücksichtigt werden können, wirken sich bei dichten Böden kaum auf die Prognose des HCA-Modells aus (Staubach & Wichtmann 2020). Um zu überprüfen, ob von ideal dränierten Bedingungen ausgegangen werden kann, wurden im Vorfeld Simulationen mit gekoppelten Elementen durchgeführt. Da es zu keinem Aufbau von Porenwasserüberdruck kam, wurden die nachfolgenden Simulationen unter der Annahme ideal dräniert-ter Bedingungen durchgeführt.

### 4.3 Ergebnisse der Simulationen

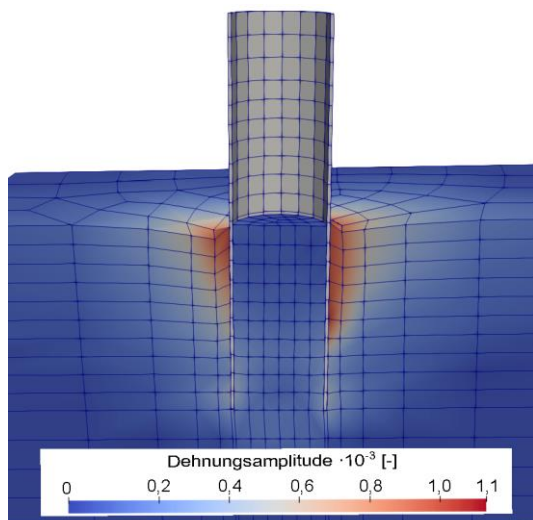
Für diesen Beitrag wurden drei der von Cuéllar durchgeführten Versuche mit dem HCA-Modell simuliert. Sie unterscheiden sich in der aufgetragenen zyklischen Last, welche in Tabelle 1 gegeben ist.

**Tabelle 1** Mittelwert  $F_{\text{mittel}}$  und Amplitude  $F_{\text{ampl}}$  der zyklischen Last für die simulierten Versuche.

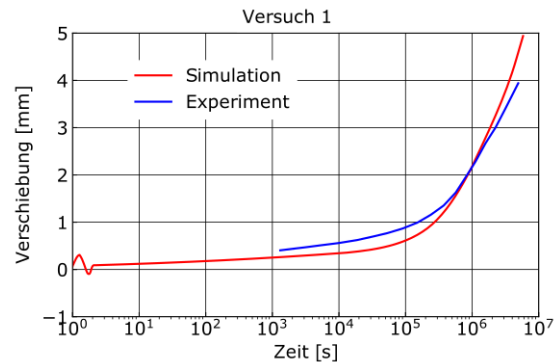
	$F_{\text{mittel}}$ [N]	$F_{\text{ampl}}$ [N]
Versuch 1	5	10
Versuch 2	10	20
Versuch 3	15	25

Das Feld der Dehnungsamplitude, welche aus dem im zweiten impliziten Zyklus aufgezeichneten Dehnungspfad ermittelt wurde, ist in Abbildung 2 dargestellt. Die größten Dehnungen treten im oberflächennahen Bereich auf. Das deformierte Netz stellt den Verformungszustand nach  $10^6$  aufgetragenen Lastzyklen dar. Es ist eine deutliche Setzung des Bodens im Nahbereich des Pfahls zu erkennen.

Die horizontale Verschiebung des Pfahls in Abhängigkeit der Anzahl der aufgetragenen Zyklen ist in Abbildung 3 dargestellt. Dabei sind die Ergebnisse der Simulation den im Versuch 1 gemessenen Verschiebungen gegenübergestellt. Entsprechend den in Cuéllar (2011) verfügbaren Daten sind die Ergebnisse des Versuchs erst ab etwa  $10^3$  Zyklen dargestellt.



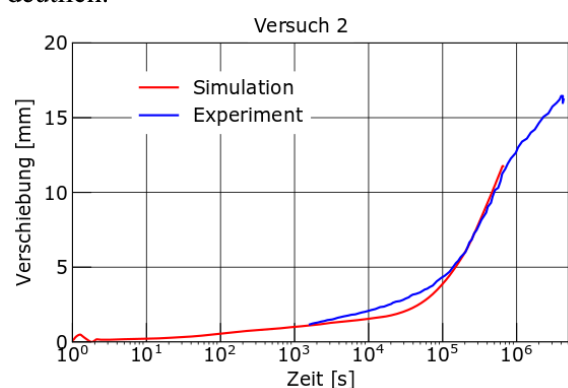
**Abbildung 2** Feld der Dehnungsamplitude und deformiertes Netz nach  $10^6$  Zyklen



**Abbildung 3** Vergleich der horizontalen Verschiebung des Pfahls aus Experiment und Simulation

Der Vergleich zwischen Simulation und Versuch zeigt, dass das HCA-Modell das Verformungsverhalten des Pfahls unter der hochzyklischen Belastung zutreffend wiedergeben kann. Zum Ende des Versuchs nimmt der Unterschied etwas zu, wobei die Simulation eine geringfügig zu große Verschiebung des Pfahls prognostiziert.

Ein Vergleich der Ergebnisse des zweiten Versuchs mit der zugehörigen Simulation findet sich in Abbildung 4. Aufgrund der größeren Belastung kommt es zu einer deutlich größeren horizontalen Verschiebung des Pfahlkopfes. Die im Versuch erreichte Verdrehung des Pfahls von ungefähr  $2,0^\circ$  nach  $5 \cdot 10^6$  Zyklen überschreitet den üblichen Grenzwert für die Gebrauchstauglichkeit realer OWEA (ca.  $0,5^\circ$ ) deutlich.

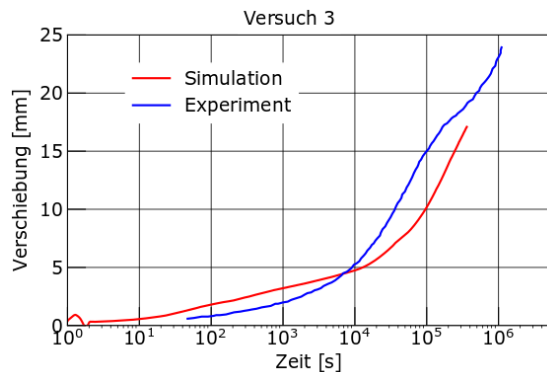


**Abbildung 4** Vergleich der horizontalen Verschiebung des Pfahls aus Experiment und Simulation

Da die berechneten Dehnungsamplituden im Pfahlnahbereich deutlich oberhalb von  $10^{-3}$  lagen, liegt der zweite Versuch eigentlich außerhalb des klassischen Anwendungsbereiches des HCA-Modells. Die Ergebnisse der Simula-

tion sind nur bis etwa  $0,8 \cdot 10^6$  Zyklen dargestellt, da aufgrund der großen Deformationen anschließend keine Konvergenz mehr erzielt werden konnte. Bis zu diesem Zeitpunkt sind die numerischen Ergebnisse jedoch in guter Übereinstimmung mit den gemessenen Werten.

Auch im dritten Versuch wurden sehr große horizontale Verschiebungen erreicht. Der Vergleich in Abbildung 5 zeigt, dass die Ergebnisse der Simulation nun stärker von den Versuchsergebnissen abweichen. Die gemessene Verschiebung ist zunächst geringer als diejenige aus der Simulation, nimmt ab  $10^4$  Zyklen aber deutlich stärker zu. Nach etwa 17 mm Pfahlkopfverschiebung (Verdrehung von etwa  $2^\circ$ ) wurde in der Simulation keine Konvergenz mehr erreicht.



**Abbildung 5** Vergleich der horizontalen Verschiebung des Pfahls aus Experiment und Simulation

## 5 ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag wurden kleinmaßstäbliche Modellversuche an Monopiles, welche mit bis zu fünf Millionen Lastzyklen beansprucht wurden, unter Verwendung des HCA-Modells simuliert. Die Ergebnisse der Simulationen zeigen eine gute Überstimmung mit den in den Versuchen gemessenen Verschiebungen des Pfahls. Das HCA-Modell ist demzufolge auch für die Simulation von Problemstellungen mit mehreren Millionen Lastzyklen geeignet, solange die Verformungen die Grenzwerte der Gebrauchstauglichkeit nicht zu stark überschreiten.

## LITERATUR

- P. Cuéllar (2011). Pile Foundations for Offshore Wind Turbines: Numerical and Experimental Investigations on the Behaviour under Short-Term and Long-Term Cyclic Loading, Dissertation, Technische Universität Berlin, Fakultät VI - Planen Bauen Umwelt
- J. Machacek, T. Wichtmann, H. Zachert, T. Triantafyllidis (2018). Long-term settlements of a ship lock: Measurements vs. FE-prediction using a high cycle accumulation model, *Computers and Geotechnics* 97, 222 – 232
- J. Machacek (2020). Contributions to the numerical modelling of saturated and unsaturated soils, Dissertation, Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
- A. Niemunis, I. Herle (1997). Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 2(4):279-299
- A. Niemunis, T. Wichtmann, T. Triantafyllidis (2005). A high-cycle accumulation model for sand, *Computers and Geotechnics* 32, 245–263
- P. Staubach, T. Wichtmann (2020a). Long-term deformations of monopile foundations for offshore wind turbines studied with a high-cycle accumulation model, *Computers and Geotechnics*, in print
- P. Staubach, J. Machacek, M.C. Moscoso, and T. Wichtmann (2020b). Impact of the installation on the long-term cyclic behaviour of piles in sand: a numerical study. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, submitted
- P.-A. von Wolffersdorff (1996). A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 1(3):251-271
- T. Wichtmann (2016). Soil behaviour under cyclic loading - experimental observations, constitutive description and applications. Habilitation, Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Heft 181
- T. Wichtmann, J. Machacek, H. Zachert, H. Günther (2018). Validierung eines hochzyklischen Akkumulationsmodells anhand von Modellversuchen und Messungen an realen Bauwerken, *Bautechnik* 96, 160-175
- H. Zachert (2015). Zur Gebrauchstauglichkeit von Gründungen für Offshore- Windenergieanlagen, Dissertation, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik am Karlsruher Institut für Technologie, Heft 180